

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ) (2.4.6)

УДК 662.6.9

DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-106-112

### Характеристики горения бурогоугольного карбонизата и возможность его применения в качестве энергетического топлива

А.В. Жуйков, А.И. Матюшенко, Д.А. Логинов

Вовлечение высококалорийного топлива, такого как карбонизированный уголь, в топливно-энергетический баланс страны может благотворно повлиять на общее ресурсосбережение ископаемого твердого топлива при производстве тепловой и электрической энергии. С этой целью проведен сравнительный анализ, включающий в себя определение основных характеристик горения бородинского угля и карбонизата, полученного при частичной газификации бородинского бурого угля при температурах 700...800 °С в реакторе периодического действия. Для этого установлен теплотехнический и элементный состав топлив, выполнена качественная оценка поверхностей топливных частиц с использованием метода растровой электронной микроскопии. С помощью метода термогравиметрического анализа получены следующие параметры угля и бурогоугольного карбонизата: температура зажигания и выгорания коксового остатка, максимальная скорость реакции при горении, скорость изменения массы на разных этапах горения, интервалы экзотермических и эндотермических реакций, максимальная интенсивность теплового потока. Отмечено влияние выхода летучих веществ на процесс горения при нагреве. Доказано, что температура зажигания угольного карбонизата на 30% выше, чем у угля, температура выгорания больше на 25%, при этом удельная теплота сгорания карбонизата в 1,8 раза больше теплоты сгорания угля. Проведенная оценка свойств карбонизата продемонстрировала возможность его использования на объектах теплоэнергетики в качестве добавочного энергетического топлива.

*Ключевые слова:* уголь, карбонизат, частичная газификация, сжигание, термогравиметрический анализ, ресурсосбережение, энергетическое топливо.

*Для цитирования:* Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Логинов Д.А. Характеристики горения бурогоугольного карбонизата и возможность его применения в качестве энергетического топлива // Вестник МЭИ. 2023. № 1. С. 106—112. DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-106-112.

### Combustion Characteristics of Lignite Carbonizate and the Possibility of Using It as Power Plant Fuel

A.V. Zhuikov, A.I. Matyushenko, D.A. Loginov

The involvement of high-calorific fuel, such as carbonized coal, in the country's fuel and energy balance can have a beneficial effect on the overall saving of solid fossil fuel resources in the production of heat and electricity. To this end, a comparative analysis was carried out, including determination of the main combustion characteristics of Borodino coal and carbonizate obtained by partially gasifying Borodino brown coal at temperatures of 700–800 °C in a batch reactor. To do so, the thermal and elemental composition of fuels was determined, and a qualitative assessment of fuel particle surfaces was carried out using the scanning electron microscopy method. Using the thermogravimetric analysis method, the following parameters of coal and lignite carbonizate were determined: the coke residue ignition and burnout temperature, the maximum combustion reaction rate, the mass variation rate at different combustion stages, the exothermic and endothermic reactions intervals, and the maximum heat flux intensity. The effect the release of volatiles has on the combustion process in the course of heating has been noted. It has been shown that the coal carbonizate ignition temperature is by 30% higher than that of coal; the burnout temperature is by 25% higher, whereas the carbonizate specific heating value is 1.8 times higher than that of coal. The accomplished assessment of carbonizate properties has demonstrated the possibility of its use at thermal power facilities as supplementary power plant fuel.

*Key words:* coal, carbonizate, partial gasification, combustion, thermogravimetric analysis, resource saving, power plant fuel.

*For citation:* Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Loginov D.A. Combustion Characteristics of Lignite Carbonizate and the Possibility of Using It as Power Plant Fuel. Bulletin of MPEI. 2023;1:106—112. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2023-1-106-112.

## Введение

В регионах Российской Федерации, где отсутствует газоснабжение, выработка тепловой и электрической энергии на теплоэлектростанциях и промышленно-отопительных котельных осуществляется путем сжигания твердого ископаемого топлива [1]. Примером служат такие города как: Красноярск, Абакан, Братск и др., где на объектах теплоэнергетики основным энергетическим топливом является бурый уголь Ирша-Бородинского месторождения, входящего в Канско-Ачинского угольный бассейн [2, 3]. Сжигание угля в топках котлов сопровождается значительными выбросами вредных веществ в продуктах сгорания, таких как оксиды азота и серы, мелкодисперсные частицы золы, причем газообразные вредные вещества, как правило, образуются в топках котлов при горении летучих веществ [4]. Одним из возможных способов снижения массовых выбросов вредных газообразных веществ может стать применение углеродного остатка частичной газификации энергетического угля (карбонизата) с низким содержанием летучих веществ при совместном его сжигании с углем. В процессе частичной газификации в результате термохимической деструкции летучие вещества, содержащиеся в угле, переходят в газообразное состояние и удаляются из реактора в виде генераторного газа. Углеродистый остаток на 80...90% состоит из углерода, оставшаяся часть представляет собой минеральную часть исходного угля. Данный углеродистый остаток успешно применяют в качестве бездымного топлива [5, 6]. Использование бездымного топлива зарекомендовало себя после проведения экспериментов по его сжиганию в автономных источниках теплоснабжения частного сектора г. Красноярска. Установлено, что суммарное воздействие вредных веществ на окружающую среду снижается почти в 30 раз по сравнению со сжиганием угля [7]. Применение карбонизированного угля в качестве энергетического монотоплива на промышленных предприятиях осложняется как низкой экономической эффективностью, так и недостаточно стабильным процессом горения в топке котла из-за минимального содержания остаточных летучих веществ [8, 9], поэтому карбонизат энергетических углей целесообразно применять только в качестве добавочного топлива.

Углубленное исследование горения карбонизированного угля возможно осуществить, применяя термогравиметрический метод (ТГА), позволяющий установить основные характеристики горения: основные этапы, температуры зажигания и выгорания, количественное изменение массы, максимальную скорость реакции, эндотермические и экзотермические эффекты и др. [10 — 13].

Цель работы — оценка потенциала карбонизата в качестве альтернативного топлива при сравнении основных характеристик горения до и после карбонизации бурого угля. Результаты настоящей работы можно

использовать при проектировании теплоэнергетического оборудования.

## Характеристика образца и методы исследования

Исследованы бородинский бурый уголь и его карбонизат, полученный в шахтном реакторе частичной газификации в обратной тепловой волне (ОТВ).

В реактор периодического действия диаметром 300 мм (рис. 1) через загрузочный люк загружали уголь, его верхний слой зажигали газовой горелкой, а в нижнюю часть засыпки через колосниковую решетку подавали воздух. В результате формировалась обратная тепловая волна, при которой высокотемпературный фронт физико-химических превращений сдвигался навстречу потоку воздуха. Образующийся генераторный газ выходил через патрубок, расположенный в верхней части реактора. Температуру внутри реактора контролировали хромель-алюмелевыми термопарами. Получившийся карбонизат выгружали через колосниковую решетку и патрубок для выгрузки карбонизата. Температура во фронте достигала 700...800 °С.

В ходе теплотехнического и элементного анализов угля и карбонизата установлены следующие показатели: аналитическая влажность — по ГОСТ 8.649—2015, зольность — по ГОСТ 55661—2013, выход летучих веществ — по ГОСТ Р 55660—2013, содержание серы — по ГОСТ 32979—2014, высшая теплота сгора-

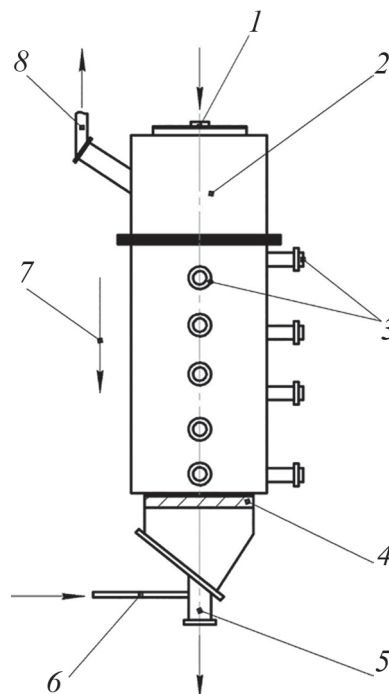


Рис. 1. Реактор периодического действия:

1 — люк для загрузки топлива; 2 — реактор; 3 — термопары; 4 — колосниковая решетка; 5 — патрубок для выгрузки карбонизата; 6 — подача окислителя; 7 — направление тепловой волны внутри реактора; 8 — патрубок для выхода генераторного газа

ния — по ГОСТ 147—2013, элементный состав — по ГОСТ 32979—2014, содержание кислорода — по ГОСТ 27313—2015. Результаты теплотехнического и элементного анализов приведены в табл. 1.

Влажность угля в аналитическом состоянии составила 13,6% (см. табл. 1), в рабочем состоянии она может достигать до 35%, влажность карбонизата — всего 0,4%. Зольность карбонизата на 40% выше, чем у исходного угля, а показатель содержания летучих веществ меньше почти в 6 раз. Теплота сгорания карбонизата в 1,84 раза превысила аналогичный показатель угля ввиду большего содержания углерода и меньшего содержания влаги и кислорода по сравнению с исходным углем (см. табл. 1).

Перед проведением термогравиметрического анализа образцы топлива размалывали в дисковой мельнице Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Германия) до размера 1000 мкм, затем с помощью просеивающей машины RETSCH AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Германия) высеивали класс крупности 100...250 мкм (типичный размер топлива при факельном сжигании угля).

Исследование горения топлива проходило на термогравиметрическом анализаторе SDT Q600 (США) при скорости нагрева 20 °С/мин в потоке воздуха 50 мл/мин. Масса навески —  $6,0 \pm 0,25$  г. Полученные термограммы обрабатывали с помощью ПО Universal Analysis 2000. Определялись следующие параметры горения: максимальные скорость реакции  $DTG_{\max}$  и температура  $T_{DTG}$ , соответствующие  $DTG_{\max}$ . Также по методу пересечения кривых [14 — 20] вычисляли температуры зажигания коксового остатка  $T_z$  и выгорания  $T_v$ . По термограммам ДСК устанавливали экзотермические, эндотермические эффекты, максимальную ин-

тенсивность теплового потока  $ДСК_{\max}$  при температуре  $T_{ДСК}$ .

### Результаты и обсуждения

Результаты исследований горения угля и карбонизата представлены на рис. 2. Основные характеристики горения даны в табл. 2. Нагрев угля начался с 30 °С и сопровождался удалением абсорбированной влаги в интервале температур 30...110 °С (см. рис. 2, а). При удалении влаги наблюдалась убыль массы образца на 13,6% с выраженным эндотермическим эффектом (см. рис. 2, в). При дальнейшем нагреве угля начинается его термическое разложение за счет взаимодействия кислорода с углеродом, инициирующее выход летучих веществ. В интервале температур 110...250 °С убыль массы незначительна (до 2%) (см. рис. 2, а). Зажигание и горение летучих веществ при нагреве угля протекают в интервале температур 250...330 °С и сопровождаются ростом скорости реакции с 0,4 до 5,3 %/мин (см. рис. 2, б). Убыль при горении летучих составила почти 9% (см. рис. 2, а). Интенсивность теплового потока выросла в 7 раз (см. рис. 2, в). Горение летучих на поверхности угольных частиц за счет теплообмена способствовало зажиганию коксового остатка при температуре 333 °С (см. табл. 2). Горение коксового остатка, сопровождающееся экзотермическим эффектом (см. рис. 2, в), проходит в интервале температур 333...539 °С совместно с догоранием летучих веществ. Убыль массы при горении коксового остатка и догорания летучих веществ — 71,8% (см. рис. 2, а). Основной пик ДТГ состоит из двух небольших пиков, находящихся на вершине в коротком интервале температур (см. рис. 2, б). Максималь-

Таблица 1

### Результаты технического и элементного анализов

Топливо	$W^a$ , %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	Элементный состав, % масс.					$Q_i^r$ , МДж/кг
				$C^{daf}$	$H^{daf}$	$N^{daf}$	$S^{daf}$	$O^{daf}$	
Бородинский уголь	13,6	6,2	47,3	72,5	5,1	1,0	0,3	21,1	16,09
Карбонизат	0,4	8,6	8,2	93,6	2,5	2,4	0,2	1,3	29,61

Примечание:  $W^a$  — содержание влаги в аналитическом состоянии;  $A^d$  — содержание золы в сухом состоянии;  $V^{daf}$  — содержание летучих веществ в сухом-беззольном состоянии; C, H, N, S, O — содержание углерода, водорода, азота, общей серы и кислорода;  $Q_i^r$  — низшая теплота сгорания в рабочем состоянии

Таблица 2

### Основные параметры горения образцов топлива

Скорость нагрева, °С/мин	$T_z$ , °С	$T_v$ , °С	$DTG_1$ , %/мин	$DTG_2$ , %/мин	$T_1$ , °С	$T_2$ , °С	$ДСК_{\max}$ , мВт/мг	$T_{ДСК}$ , °С
УГ	333	539	27,9	25,8	381	401	113,5	411
УГ <sub>карб</sub>	434	672	21,6	1,1	476	662	147,6	479

Примечание:  $T_z$ ,  $T_v$  — температуры зажигания коксового остатка и выгорания топлива;  $DTG_1$ ,  $DTG_2$  — максимальная скорость реакции;  $T_1$ ,  $T_2$  — температуры, соответствующие максимальной скорости реакции;  $ДСК_{\max}$  — максимальная интенсивность теплового потока;  $T_{ДСК}$  — температура, соответствующая максимальной интенсивности теплового потока

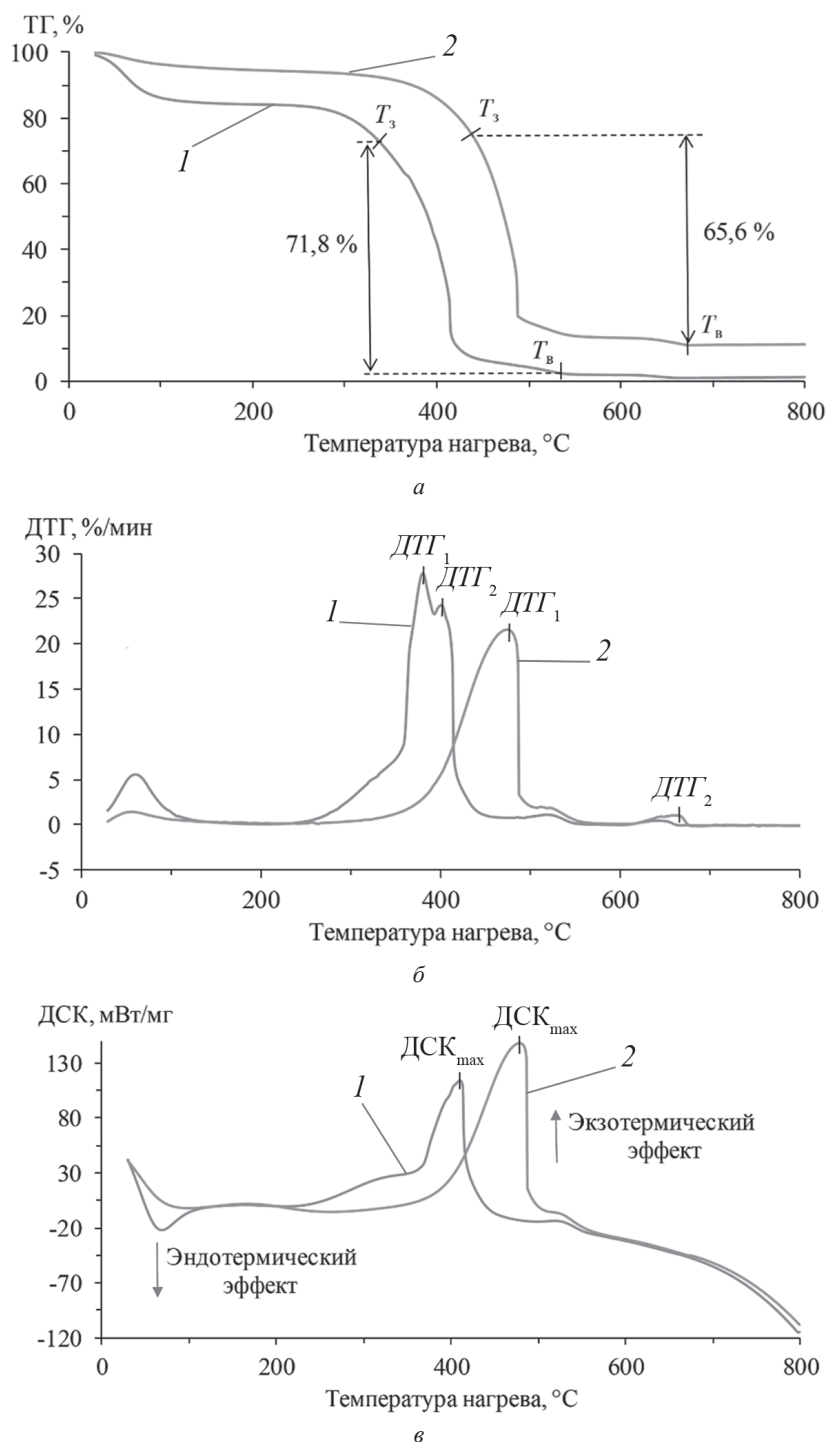


Рис. 2. Горение топлива:

*a* — профили кривых ТГ; *б* — профили кривых ДТГ; *в* — профили кривых ДСК; 1 — УГ 100%; 2 — УГ<sub>карб</sub> 100%

ная скорость реакции в первом пике  $ДТГ_1$  достигает 27,9 %/мин, в  $ДТГ_2$  — 25,8 %/мин, интервал температур между  $T_1$  и  $T_2$  (см. табл. 2) — 20 °C. Максимальная интенсивность теплового потока достигает 113,5 мВт/мг при температуре 411 °C.

Нагрев карбонизата начался с 30 °C. В интервале температур 30...110 °C происходит удаление абсорбированной влаги, выраженное небольшим эндотермичес-

ким эффектом (см. рис. 2, в) с убылью массы до 4% (см. рис. 2, а). Эндотермический эффект у карбонизата при удалении влаги меньше чем у угля за счет низкого содержания влаги в топливе (см. табл. 1). При дальнейшем нагреве в интервале температур 110...300 °C убыль массы практически отсутствует, кривая ТГ имеет горизонтальный вид с небольшим уклоном (см. рис. 2, а). Основное термическое разложение, сопровождаю-

щееся выделением летучих веществ, начинается в интервале температур 300...430 °С. Убыль массы при этом составила 15,3%, скорость реакции увеличилась в 19 раз, интенсивность теплового потока выросла на 75 мВт/мг. Зажигание коксового остатка происходит в области более высоких температур из-за минимального содержания летучих по сравнению с углем, температура зажигания карбонизата на 101 °С выше, чем у угля. Горение коксового остатка выражено двумя пиками ДТГ и одним пиком ДСК, сопровождается убылью массы до 65,6% (см. рис. 2, а). Максимальная скорость реакции по сравнению с углем упала на 29% (см. табл. 2). Максимальная скорость реакции второго пика ДТГ<sub>2</sub>, демонстрирующая догорание особо плотного углеродного остатка, составила всего 1,1 %/мин при температуре 662 °С. За счет увеличения теплоты сгорания карбонизата по сравнению с углем (см. табл. 1) максимальная интенсивность теплового потока карбонизата выросла на 30% по сравнению с углем (см. табл. 2). Температура выгорания карбонизата — 672 °С.

Оценка применения карбонизата в качестве энергетического топлива на объектах теплоэнергетики, где проектным топливом является бородинский бурый уголь, проходила по методике, представленной в [21]. Она включает в себя сравнение топлива по теплотехническим показателям, химическому составу золы, шлакующим свойствам, экологическим показателям. Влажность карбонизата ниже влажности угля, поэтому затраты энергии на его сушку будут существенно ниже. Зольность карбонизата немного больше зольности угля, а выход летучих веществ меньше в разы, поэтому в качестве основного топлива использовать карбонизат не представляется возможным [8, 9], применять

его следует только при совместном сжигании с углем. Высокая удельная теплота сгорания карбонизата в этом случае положительно скажется на технологических показателях котельного агрегата и повлечёт за собой снижение общего расхода топлива. Химический состав золы после карбонизации не меняется по сравнению с исходным углем, а термическая обработка угля снижает шлакующие свойства топлива [22]. Экологические показатели при использовании карбонизата в качестве добавочного топлива к углю улучшаются за счет снижения содержания летучих веществ в топливной смеси.

### Заключение

Исследован процесс горения бурого угля до и после его карбонизации с применением метода термогравиметрического анализа в потоке воздуха при скорости нагрева 20 °С/мин. Установлены основные характеристики горения угля и карбонизата. Температурная область горения карбонизата по сравнению с углем сместилась в область более высоких температур, а максимальная скорость реакции при горении коксового остатка снизилась на 29%. Подтверждено, что одним из основных факторов, влияющих на характеристики горения при нагреве, является содержание летучих веществ в топливе.

Проведенная оценка возможности применения карбонизата, полученного из бурого угля, как энергетического топлива, показала, что он является перспективным энергетическим топливом при частичном его применении в смеси с проектным топливом на объектах теплоэнергетики. Результаты исследования будут востребованы при проектировании теплоэнергетических установок, работающих на твердом топливе.

### Литература

1. Семикашев В.В., Гайворонская М.С. Анализ текущего состояния и перспективы газификации России на период до 2030 г. // Проблемы прогнозирования. 2022. № 1. С. 91—100.
2. Елсуков В.К., Латушкина С.В. Образование и снижение оксидов азота при сжигании Канско-Ачинских углей на котлах с жидким шлакоудалением // Труды Братского гос. ун-та. Серия «Естественные и инженерные науки». 2018. № 1. С. 74—79.
3. Шишканов О.Г., Андруняк И.В. Управление положением факела в топочной камере котла Е-500 при тангенциальном пылеугольном сжигании // Промышленная энергетика. 2021. № 1. С. 35—43.
4. Халид Эль-Шейх и др. Образование и подавление выбросов NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>O при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO<sub>2</sub> (обзор) // Теплоэнергетика. 2020. № 1. С. 5—14.
5. Жуйков А.В., Матюшенко А.И. Способы получения и практического применения синтез-газа (обзор) // Журнал Сибирского федерального ун-та Серия «Техника и технологии». 2020. Т. 13. № 4. С. 383—405.

### References

1. Semikashev V.V., Gayvoronskaya M.S. Analiz Tekushchego Sostoyaniya i Perspektivy Gazifikatsii Rossii na Period do 2030 g. Problemy Prognozirovaniya. 2022; 1:91—100. (in Russian).
2. Elsukov V.K., Latushkina S.V. Obrazovanie i Snizhenie Oksidov Azota pri Szhiganii Kansko-Achinskikh Ugley na Kotlakh s Zhidkim Shlakoudaleniem. Trudy Bratskogo Gos. Un-ta. Seriya «Estestvennye i Inzhenernye Nauki». 2018;1:74—79. (in Russian).
3. Shishkanov O.G., Andrunyak I.V. Upravlenie Polozheniem Fakela v Topochnoy Kamere Kotla E-500 pri Tangentsial'nom Pyleugol'nom Szhiganii. Promyshlennaya Energetika. 2021;1:35—43. (in Russian).
4. Khalid El'-Sheykh i dr. Obrazovanie i Podavlenie Vybrosov NO<sub>x</sub> i N<sub>2</sub>O pri Szhiganii Topliv v Srede Kisloroda s Retsirkulyatsiey CO<sub>2</sub> (obzor). Teploenergetika. 2020;1:5—14. (in Russian).
5. Zhuykov A.V., Matyushenko A.I. Sposoby Polucheniya i Prakticheskogo Primeneniya Sintez-gaza (Obzor). Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Un-ta Seriya «Tekhnika i Tekhnologii». 2020;13;4:383—405. (in Russian).



6. **Исламов С.Р.** Термическая переработка как новый уровень обогащения угля // Уголь. 2020. № 5. С. 48—53.
7. **Степанов С.Г., Михалев И.О., Евтушенко Е.М., Логинов Д.А., Деменчук С.В.** Бездымное бытовое топливо: опыт применения в Красноярске // Уголь. 2020. № 12. С. 56—62.
8. **Wang C., Wang C., Tang G., Zhang J., Gao X., Che D.** Co-combustion Behaviors and NO Formation Characteristics of Semi-coke and Antibiotic Filter Residue under Oxy-fuel Condition // Fuel. 2022. V. 319(6). P. 123779.
9. **Zheng S., Hu Y., Wang Z., Cheng X.** Experimental Investigation on Ignition and Burnout Characteristics of Semi-coke and Bituminous Coal Blends // J. Energy Inst. 2020. V. 93(4). Pp. 1373—1381.
10. **Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Кузнецов П.Н., Стебелева О.П., Самойло А.С.** Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Хакасия, сосновых опилок и их смесей // Журнал Сибирского федерального ун-та. Серия «Техника и технологии». 2021. Т. 14. № 6. С. 611—622.
11. **Cao Y., Liu Y., Li Z., Zong P., Hou J., Zhang Q., Gou X.** Synergistic Effect, Kinetics, and Pollutant Emission Characteristics of Co-combustion of Polymer-containing Oily Sludge and Cornstalk Using TGA and Fixed-bed Reactor // Renew. Energy. 2022. V. 185. Pp. 748—758.
12. **Богомолов А.Р., Петров И.Я., Жалмагамбетов У.К.** Термический анализ углей казахстанских месторождений // Теплоэнергетика. 2020. № 3. С. 24—32.
13. **Cong K., Han F., Zhang Y., Li Q.** The Investigation of Co-combustion Characteristics of Tobacco Stalk and low Rank Coal Using a Macro-TGA // Fuel. 2019. V. 237. Pp. 126—132.
14. **Liu Z., Quek A., Kent Hoekman S., Srinivasan M.P., Balasubramanian R.** Thermogravimetric Investigation of Hydrochar-lignite Co-combustion // Bioresour. Technol. 2013. V. 133. Pp. 646—652.
15. **Ding G., He B., Yao H., Cao Y., Su L., Duan Z.** Co-combustion Behaviors of Municipal Solid Waste and Low-rank Coal Semi-coke in Air or Oxygen/carbon Dioxide Atmospheres // J. Therm. Anal. Calorim. 2021. V. 143. Pp. 619—635.
16. **Wang C., Wang F., Yang Q., Liang R.** Thermogravimetric Studies of the Behavior of Wheat Straw with Added Coal During Combustion // Biomass Bioenergy. 2009. V. 33. Pp. 50—56.
17. **Li X.G., Ma B.G., Xu L., Hu Z-W., Wang X-G.** Thermogravimetric Analysis of the Co-combustion of the Blends with High Ash Coal and Waste Tyres // Thermochim. Acta. 2006. V. 441. Pp. 79—83.
18. **Lu J-J., Chen W-H.** Investigation on the Ignition and Burnout Temperatures of Bamboo and Sugarcane Bagasse by Thermogravimetric Analysis // Appl. Energy. 2015. V. 160. Pp. 49—57.
19. **Niu S.L., Han K.H., Lu C.M.** Characteristic of Coal Combustion in Oxygen/carbon Dioxide Atmosphere
6. **Islamov S.R.** Termicheskaya Pererabotka kak Novyy Uroven' Obogashcheniya Uglya. Ugol'. 2020;5: 48—53. (in Russian).
7. **Stepanov S.G., Mikhalev I.O., Evtushenko E.M., Loginov D.A., Demenchuk S.V.** Bezdymnoe Bytovoe Toplivo: Opyt Primeneniya v Krasnoyarske. Ugol'. 2020; 12:56—62. (in Russian).
8. **Wang C., Wang C., Tang G., Zhang J., Gao X., Che D.** Co-combustion Behaviors and NO Formation Characteristics of Semi-coke and Antibiotic Filter Residue under Oxy-fuel Condition. Fuel. 2022;319(6):123779.
9. **Zheng S., Hu Y., Wang Z., Cheng X.** Experimental Investigation on Ignition and Burnout Characteristics of Semi-coke and Bituminous Coal Blends. J. Energy Inst. 2020;93(4):1373—1381.
10. **Zhuykov A.V., Matyushenko A.I., Kuznetsov P.N., Stebeleva O.P., Samoylo A.S.** Termogravimetricheskii Analiz Gorennya Kamennykh Ugley Respubliki Khakasiya, Sosnovykh Opilok i Ikh Smesey. Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo Un-ta. Seriya «Tekhnika i Tekhnologii». 2021;14;6:611—622. (in Russian).
11. **Cao Y., Liu Y., Li Z., Zong P., Hou J., Zhang Q., Gou X.** Synergistic Effect, Kinetics, and Pollutant Emission Characteristics of So-combustion of Polymer-containing Oily Sludge and Cornstalk Using TGA and Fixed-bed Reactor. Renew. Energy. 2022;185:748—758.
12. **Bogomolov A.R., Petrov I.Ya., Zhalmagambetov U.K.** Termicheskii Analiz Ugley Kazakhstanskikh Mestorozhdeniy. Teploenergetika. 2020;3:24—32. (in Russian).
13. **Cong K., Han F., Zhang Y., Li Q.** The Investigation of Co-combustion Characteristics of Tobacco Stalk and low Rank Coal Using a Macro-TGA. Fuel. 2019;237: 126—132.
14. **Liu Z., Quek A., Kent Hoekman S., Srinivasan M.P., Balasubramanian R.** Thermogravimetric Investigation of Hydrochar-lignite Co-combustion. Bioresour. Technol. 2013;133:646—652.
15. **Ding G., He B., Yao H., Cao Y., Su L., Duan Z.** Co-combustion Behaviors of Municipal Solid Waste and Low-rank Coal Semi-coke in Air or Oxygen/carbon Dioxide Atmospheres. J. Therm. Anal. Calorim. 2021;143: 619—635.
16. **Wang C., Wang F., Yang Q., Liang R.** Thermogravimetric Studies of the Behavior of Wheat Straw with Added Coal During Combustion. Biomass Bioenergy. 2009;33:50—56.
17. **Li X.G., Ma B.G., Xu L., Hu Z-W., Wang X-G.** Thermogravimetric Analysis of the Co-combustion of the Blends with High Ash Coal and Waste Tyres. Thermochim. Acta. 2006;441:79—83.
18. **Lu J-J., Chen W-H.** Investigation on the Ignition and Burnout Temperatures of Bamboo and Sugarcane Bagasse by Thermogravimetric Analysis. Appl. Energy. 2015;160:49—57.
19. **Niu S.L., Han K.H., Lu C.M.** Characteristic of Coal Combustion in Oxygen/carbon Dioxide Atmosphere

and Nitric Oxide Release During this Process // *Energy Convers. Manag.* 2011. V. 52. Pp. 532—537.

20. **Bala-Litwiniak A., Zajemska M.** Computational and Experimental Study of Pine and Sunflower Husk Pellet Combustion and Co-combustion with Oats in Domestic Boiler // *Renew. Energy*. 2020. V. 162. Pp. 151—159.

21. **Майданик М.Н., Вербовецкий Э.Х., Тугов А.Н.** Предварительная оценка возможности перевода котлов тепловых электростанций на сжигание альтернативного угля // *Теплоэнергетика*. 2021. № 9. С. 33—42.

22. **Дубровский В.А.** Методы и средства повышения эффективности энергетического использования углей Канско-Ачинского бассейна: дис. ... доктора технических наук. Красноярск: Изд-во Сибирского федерального ун-та, 2008.

and Nitric Oxide Release During this Process. *Energy Convers. Manag.* 2011;52:532—537.

20. **Bala-Litwiniak A., Zajemska M.** Computational and Experimental Study of Pine and Sunflower Husk Pellet Combustion and Co-combustion with Oats in Domestic Boiler. *Renew. Energy*. 2020;162:151—159.

21. **Maydanik M.N., Verbovetskiy E.Kh., Tugov A.N.** Predvaritel'naya Otsenka Vozmozhnosti Perevoda Kotlov Teplovykh Elektrostantsiy na Szhiganie Al'ternativnogo Uglya. *Teploenergetika*. 2021;9:33—42. (in Russian).

22. **Dubrovskiy V.A.** Metody i Sredstva Povysheniya Effektivnosti Energeticheskogo Ispol'zovaniya Ugley Kansk-Achinskogo Basseyna: Dis. ... Doktora Tekhnicheskikh Nauk. Krasnoyarsk: Izd-vo Sibirskogo Federal'nogo Un-ta, 2008. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Жуйков Андрей Владимирович** — кандидат технических наук, заведующий учебно-научной лабораторией кафедры теплотехники и гидрогазодинамики Политехнического института Сибирского федерального университета, e-mail: azhuikov@sfu-kras.ru

**Матюшенко Анатолий Иванович** — доктор технических наук, заведующий кафедрой инженерных систем зданий и сооружений Инженерно-строительного института Сибирского федерального университета, e-mail: matyshenko@icloud.com

**Логинов Дмитрий Александрович** — кандидат технических наук, заместитель технического директора ООО «Уголь-инжиниринг», e-mail: 2901496@gmail.com

#### Information about authors:

**Zhuikov Andrey V.** — Ph.D. (Techn.), Head of Educational and Scientific Laboratory of Thermal Engineering and Fluid and Gas Dynamics Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: azhuikov@sfu-kras.ru

**Matyushenko Anatoliy I.** — Dr.Sci. (Techn.), Head of Engineering Systems of Buildings and Structures Dept., Civil Engineering Institute of the Siberian Federal University, e-mail: matyshenko@icloud.com

**Loginov Dmitriy A.** — Ph.D. (Techn.), Deputy Technical Director, LLC «Ugol-engineering», e-mail: 2901496@gmail.com

**Работа выполнена при поддержке:** Красноярского краевого фонда науки в рамках проекта «Концепция развития теплоэнергетики Красноярского края»

**The work is executed at support:** Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the Framework of the Project «The Concept of Development of Thermal Power Engineering of the Krasnoyarsk Territory»

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 09.06.2022

**The article received to the editor:** 09.06.2022

**Статья принята к публикации:** 24.10.2022

**The article has been accepted for publication:** 24.10.2022